

## **CÓDIGO 1.7.05**

### **LOS NUEVOS ALGORITMOS DE PROCESADO Y TENDENCIAS EN GEOMETRÍA COMPUTACIONAL PARA LA EXPLOTACIÓN Y VALORACIÓN DE DATOS 3D**

**Bayarri Cayón, Vicente<sup>1</sup> y Castillo López, Elena<sup>2</sup>**

1: GIM Geomatics S.L. C/ Poeta José Luís Hidalgo nº5 (con frente a C/ Jesús Cancio). 39300 Torrelavega – Cantabria.

e-mail: [vicente.bayarri@gim-geomatics.com](mailto:vicente.bayarri@gim-geomatics.com), web: <http://www.pagweb.com>

2: Área de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria. Avda. Los Castros s/n, 39005, Santander  
e-mail: [castille@unican.es](mailto:castille@unican.es)

**PALABRAS CLAVE:** Documentación 3D del patrimonio, Análisis de datos 3D, Topología 3D, monitorización de patologías, apoyo a la toma de decisiones.

#### **RESUMEN**

Hoy en día hay disponibles diferentes tecnologías que permiten registrar información detallada de suficiente precisión para la mayor parte de las tareas ingenieriles en 3D, tales como láser escáner o la fotogrametría.

La documentación tradicional de edificios se ha basado en representaciones 2D y 3D del patrimonio cultural. Este tipo de documentación ha comenzado a estar obsoleta debido a que las técnicas que se utilizan para obtener estos productos no sacan provecho de la gran cantidad de información registrada y simplemente idealizan la realidad; cosa que en patrimonio histórico muchas veces no es posible debido a las irregularidades de los elementos presentes.

Por otro lado ha aparecido una nueva rama de la geometría computacional que explota los datos y las relaciones entre los diferentes elementos registrados, basándose en la topología 3D.

El tratamiento e interpretación de esta información consiste en extraer relaciones y significados que están implícitos en un conjunto de datos y expresar estos en forma explícita. Un ejemplo básico serían los planos de desplomes, el grosor de paredes o el cálculo de la curvatura o rugosidad de una pared, de una manera continua. Esta transformación de los datos deben ser procesados cuidadosamente y se asocian con lugares específicos.

En este artículo se presentan varios tipos de análisis y resultados de explotación de la información 3D de edificios. Esta nueva información puede ser de gran utilidad para apoyar la toma de decisiones y resolver problemas en el ámbito del patrimonio construido.

#### **1. INTRODUCCIÓN**

El registro de los edificios, monumentos y lugares constituye una parte de la documentación que pueda contribuir a la comprensión del patrimonio y sus valores relacionados.

Un buen registro del patrimonio cultural es esencial con el fin de adquirir conocimiento para profundizar en su comprensión, sus valores y su evolución. Dichos datos pueden ser utilizados para asegurar que el mantenimiento y la conservación del patrimonio son sensibles a su forma física, sus materiales, construcción, e importancia histórica y cultural.

No obstante, el registro debe llevarse a cabo con un nivel de detalle apropiado con el fin de proporcionar información para el proceso de identificación, comprensión, interpretación, investigación, gestión y

revalorización del patrimonio. La información debería ser facilitada por los administradores y planificadores a nivel nacional, regional o local, para llevar a cabo políticas y decisiones de desarrollo y planificación sensible.

Un proceso de registro del patrimonio cultural tendría que llevarse a cabo en los siguientes casos:

- Creación de un inventario;
- Investigación y actividades de conservación;
- Antes, durante y después de los trabajos de reparación, transformación (naturales o no) u otra intervención.
- Cuando se produce un cambio de uso o cambio de la gestión o control.

Tabla 1: (Letellier,2007) establece que de acuerdo con el marco y el alcance , se recomienda un determinado nivel de registro del patrimonio.

	Registro de reconocimiento Fiabilidad baja	Registro Preliminar. Fiabilidad media	Registro detallado Fiabilidad alta
Propósito del registro	Reconocimiento Inventario Inicial Planificación inicial Datos de referencia	planificación estado inicial investigación estabilización Pre - diseño Datos de referencia	Condiciones en las que se encuentra diseño construcción registro conforme a obra Mantenimiento / control posteridad
Fiabilidad de los dibujos	No está a escala	Planos y alzados $\pm 10$ cm Detalles: $\pm 2$ cm	Planos y alzados $\pm 1$ cm Detalles: $\pm 2$ mm
Resultados	Reportaje fotográfico Fotoplano Estado inicial Croquis descriptivos	Dibujos con escala Descripción de condición Observaciones Reportaje fotográfico	Dibujos con escala Descripción de condición Observaciones Reportaje fotográfico
Coste	Bajo	Moderado	Moderadamente alto

La exactitud del dibujo y el costo son dos parámetros altamente correlacionados. Es muy importante encontrar la tecnología más rentable que cumpla con los requisitos establecidos por las necesidades. La Figura 1 muestra la tecnología recomendada en función de la complejidad y el tamaño del objeto.

Cuando se requiere alto detalle para documentar patrimonio construido, se recomienda emplear tecnologías de escaneo láser 3D Terrestre (LE3D) y/o fotogrametría de corto alcance.

Los datos LE3D son "casi" independientes de las condiciones de iluminación y la textura de la superficie, ya que es una técnica de medición activa. Por el contrario, la fotogrametría requiere de la presencia de una buena textura de la superficie, la inserción de elementos de puntería o el uso de luz estructurada.

La densidad de mediciones 3D a partir de métodos de medición tradicionales y fotogrametría es muy baja. Por el contrario, los LE3D proporcionan una alta densidad de mediciones 3D (más de 1 millón puntos/seg ). Una resolución de un punto cada 2 a 6 mm es bastante común (Blais, 2004); esta alta densidad proporciona datos brutos suficientes con los que obtener conclusiones precisas y detalladas. No obstante,

no han surgido muchos procesos debido a la complejidad de procesamiento de dichos datos . El presente documento muestra varias posibilidades sencillas para aprovechar la enorme cantidad de datos de nubes de puntos a la hora de documentar edificios.

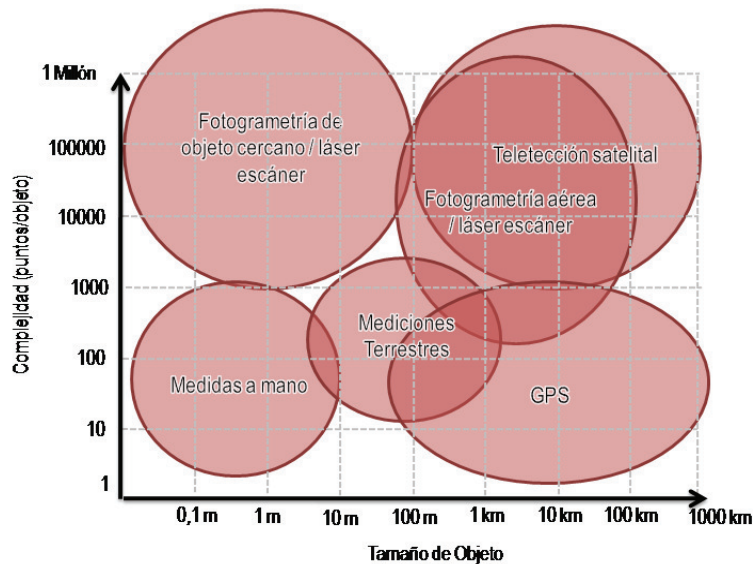


Figura 1: La tecnología recomendada en función de la complejidad y el tamaño del objeto

## 2 . DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

### 2.1 Introducción

Hay muchas tecnologías diferentes que se pueden utilizar para construir dispositivos LE3D ; cada tecnología tiene sus propias limitaciones , ventajas y los costes .

Existe una amplia gama de tecnologías de escáner láser. Una clasificación bien establecida (Curless , 2000) los divide en dos tipos: Escáneres 3D de contacto y sin contacto. Las aplicaciones de patrimonio suelen incluir los sistemas de tiempo de vuelo (Rango de medida alto/medio), de desfase (rango Medio-corto) y las tecnologías de triangulación (de muy corto alcance) .

Dos de las principales ventajas de los sistemas LE3D son que el transmisor y el receptor son coaxiales y que la precisión de la medición no depende de la distancia (que no es el caso con la triangulación, por ejemplo)

### 2.2 . SISTEMAS PULSADOS DE TIEMPO DE VUELO (TOF )

Los sistemas basados en la medición del tiempo de vuelo de un pulso de láser . Se utiliza el tiempo del viaje de ida y vuelta de un pulso de energía láser para calcular un rango.

Se basa en el principio:

$$R = \frac{c \cdot t}{2}$$

, Donde R = rango , c = velocidad de la luz y t = tiempo de vuelo del pulso de luz

### 2.3 BASADOS EN EL DESFASE DE LA ONDA.

Los sistemas de comparación de fase calculan la distancia al elemento de una manera levemente diferente. Una de comparación de fase basa su medición de rango en la diferencia en la señal entre los pulsos emitidos y recibidos, en lugar de en el tiempo de vuelo. Como se trata de procesos continuos de

comparación, estos sistemas cuentan con tasas mucho más altas de captura de datos (millones de puntos por minuto), lo que puede dar lugar a requerimientos extras significativos sobre hardware en el procesamiento posterior.

## 2.4 TRIANGULACIÓN

Los escáneres de triangulación calculan medidas de coordenadas en 3D mediante la triangulación de la posición de un punto o raya de láser. Esta técnica se denomina triangulación porque el punto del láser, la cámara y el emisor de láser forma un triángulo. Puesto que se conoce la longitud de un lado del triángulo, la distancia entre la cámara y el emisor de láser y el ángulo de la esquina emisor láser; el ángulo de la esquina cámara puede determinarse mirando en la ubicación del punto láser en el campo de visión de la cámara. Estas tres piezas de información determinan totalmente la forma y el tamaño del triángulo y ofrece la ubicación de la esquina punto láser del triángulo. Dependiendo de lo lejos que el láser alcanza una superficie, el punto láser aparece en diferentes lugares en el campo de visión de la cámara.

Normalmente, con este tipo de sistema, la distancia del escáner al objeto es menor de 0,5-1m y generalmente tienen una exactitud de medición de 0,1-0,2 mm.

## 2.5 CONCLUSIONES TECNOLOGÍA

Como se puede apreciar en la Figura 2, tanto la tecnología de tiempo de vuelo como la de desfase son eficientes para documentar edificios. Este artículo muestra los resultados derivados de estos datos de la tecnología.

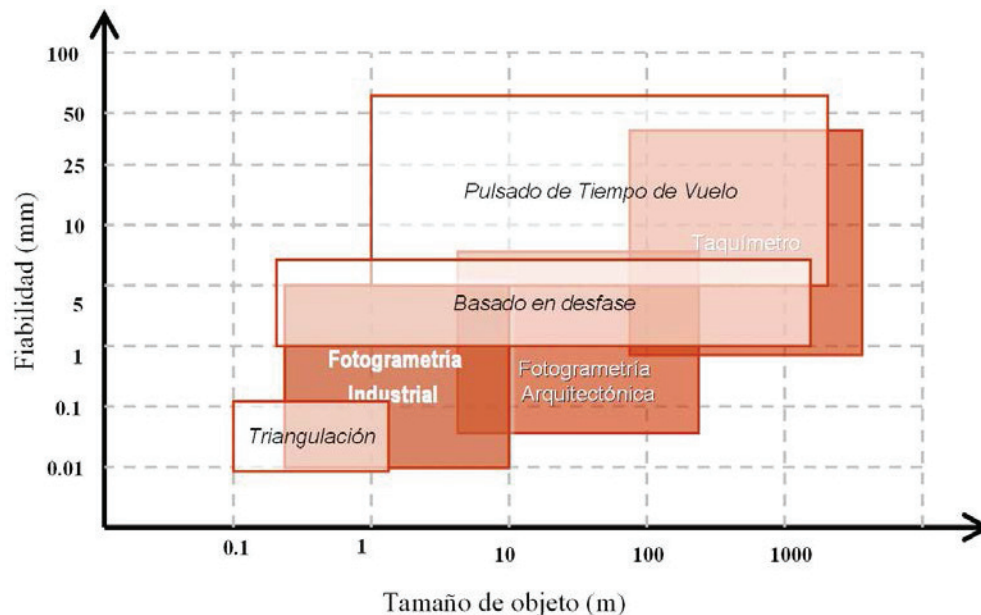


Figura 2: Resumen de la eficiencia de los diferentes sistemas láser y de fotogrametría.

## 3 . CASOS PRÁCTICOS:

### 3.1 . CARTOGRAFÍA DE ALTURA / ALTITUD DE BÓVEDAS MUY DETALLADA

Desde el punto de vista computacional, el cálculo de altura de bóvedas puede ser implementado de dos maneras diferentes.

- Altitud de bóvedas: Cuando la coordenada Z es el valor Z desde un origen relativo o la altitud si el proyecto está georeferenciado .

- Altura de las bóvedas: Donde las coordenadas Z es la distancia entre el punto en la bóveda y su homólogo en el suelo. Se recomienda para documentar cuando la pendiente del suelo es considerable.

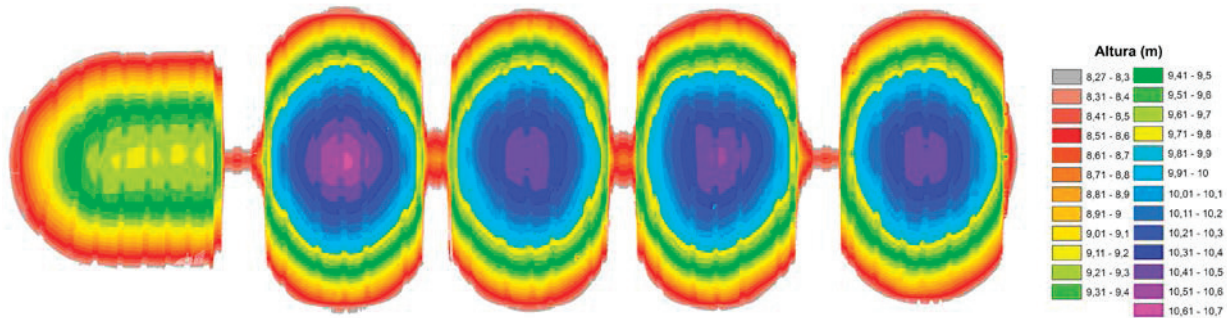


Figura 3: Altura de bóvedas de una iglesia

La densidad de puntos puede alcanzar hasta 1 cada 2x2 mm<sup>2</sup>, sin embargo, las resoluciones habituales son 1 punto cada 1cm<sup>2</sup> a 5 cm<sup>2</sup>. Esto permite al gestor del patrimonio disponer de una documentación detallada de la geometría sobre la que tomar las decisiones.

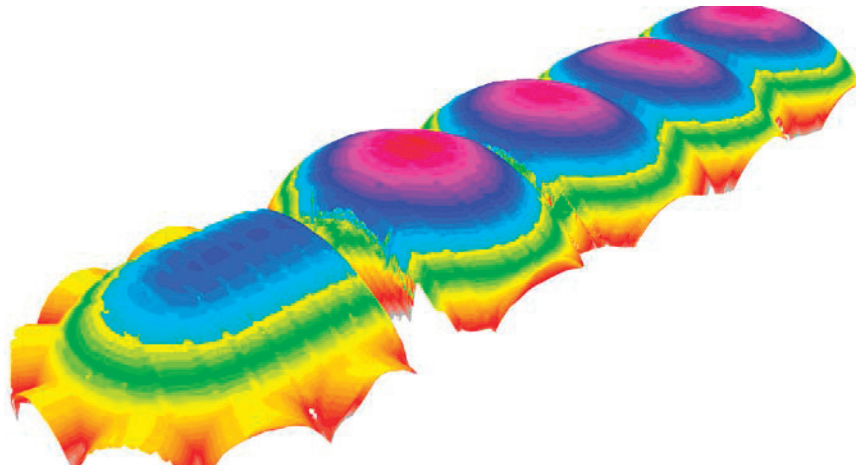


Figura 4: 2.5D representación de Bóvedas.

En este tipo de soluciones es posible ver de una manera rápida patologías constructivas tales como hundimiento, deformaciones, traslaciones o rotaciones de bóvedas; información de partida para las futuras actuaciones.

La figura 3 muestra los niveles de contorno del mapa de los resultados y la figura 4 refleja una representación 3D de los resultados de los modelos de las bóvedas de una iglesia .

### 3.2 . CASO 2 : Desplome de muros.

Los edificios pueden moverse como un bloque o por partes. En el primer caso saber la inclinación es clave. Este proceso se ha venido realizando desde principios del siglo XX, cuando las primeras mediciones detalladas de desplazamientos fueron registrados científicamente utilizando equipo topográfico. En los años treinta, se hicieron populares los péndulos como herramienta para medir el desplazamiento desde el punto respecto a la base y por lo tanto cualquier cambio en la inclinación. En los últimos años, los grados de inclinación se proporcionan por inclinómetros y sistemas de nivelación que pueden ser utilizados para medir la cantidad de asentamiento diferencial.



Sin embargo los datos LE3D se pueden utilizar con el fin de calcular el grado de inclinación o desplome tanto a partir de elementos (por ej. una pared) o unidades (es decir, capilla). Los métodos tradicionales de cálculo de los desplomes se basan en secciones transversales normalmente elaboradas con un taquímetro o perfilómetro. Estas secciones se construyen con una pequeña cantidad de información y, a veces no son representativos de todo el edificio y carecen de valores máximos o mínimos de información (por ejemplo porque se emplea muestreo regular con secciones cada 1 o 2 m ).



Figura 5: Distancia del plano de referencia en metros.

El procesado de nubes de puntos permite generar una documentación continua con la información de desplome de un área. El método se basa en el cálculo del plano normal que mejor ajusta con el elemento (es decir, la pared). Dicho plano de ajuste, desde el punto de vista computacional, consiste en un ajuste de mínimo cuadrático de un plano constreñido a la dirección normal del lugar.

El resultado es, para cada uno de 5x5 mm<sup>2</sup> la distancia entre la pared y el plano limitado. Esta documentación permite apreciar fácilmente donde se encuentra el desplome máximo y la mayor tasa de variación de desplome. La documentación generada sirve para ayudar al gestor a conocer con profundidad el estado de verticalidad del muro.

En la figura 5, se puede apreciar los valores máximos (en blanco, en la parte superior de la espadaña y la máxima variación de inclinación o torsión a la altura de los primeros arcos de ambos lados.

### 3.3 . CASO 3 : GROSOR DE BÓVEDAS .

Los espesores de las bóvedas de las mediciones con técnicas tradicionales, como la topografía, han sido difíciles de obtener, debido a la alta precisión necesaria para medir arriba y por debajo de la bóveda. Una pequeña desviación provoca un gran error, especialmente cuando se presentan bóvedas con altas pendientes.

Tradicionalmente, estas mediciones se representan como secciones transversales (Figura 6) de la cual se derivan las conclusiones y cálculos. Tradicionalmente, los levantamientos se han realizado simplificando la realidad y obviando patologías tanto de bóvedas como de otros elementos tales como cubiertas u otros elementos.

Las estimaciones, como el peso o esfuerzos de la bóveda no siempre serán precisas y por tanto recomendables su uso por los gestores.

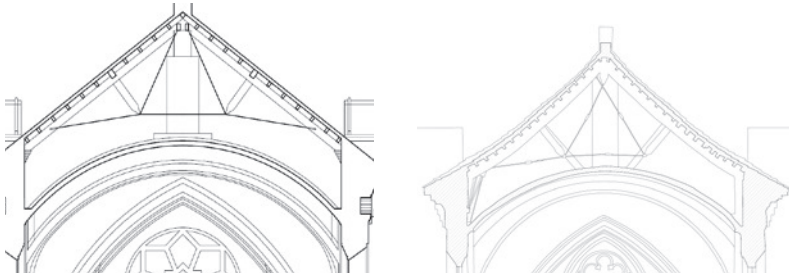


Figura 6: Sección transversal "ideal" y real de una bóveda.

Si se mide el bajocubierta , es posible calcular la distancia entre él y la bóveda con el fin de derivar espesor como se puede apreciar en la figura 7 .

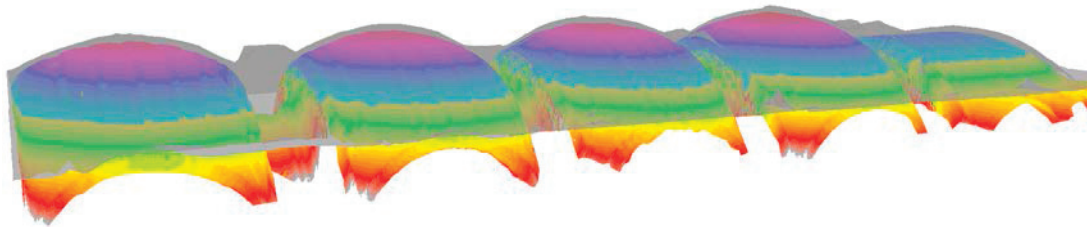


Figura 7: Muestra el modelo de bajocubierta y bóveda.

El resultado es un mapa o plano que puede contener el espesor de la bóveda de cada mm2 2x2 a varios cm2 . Tales datos permite asignar fácilmente el valor medio de espesor , donde los valores máximos y mínimos son y pueden simplificar y hacer cálculos posteriores más precisos , tales como su peso .

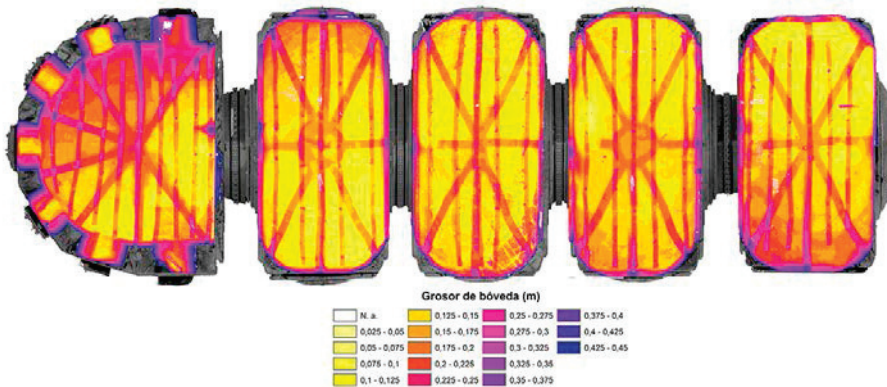


Figura 8: Ortoimagen de grosor de Bóvedas .

### 3.4 . CASO 4 : ESPESOR DE PAREDES

A veces el edificio a rehabilitar lleva sin techo varios años o décadas. Tal situación puede provocar que los agentes de la erosión tales lluvia, el hielo, el viento o la sal daños del edificio y su estructura de diferentes maneras. La pérdida de espesor en las paredes es una de las patologías más significativas cuando esto ocurre.

Los métodos no invasivos tradicionales para derivar espesor de la pared por lo general se basan en técnicas de medición tradicionales. Se caracterizan por ser muy lentas y la cantidad de datos proporcionados muy limitada. Como en el caso anterior, un pequeño error pueden derivar a conclusiones erróneas debido a la precisión requerida.

El uso de datos de LE3D puede emplearse para derivar información detallada de espesor de pared. El método se basa en la distancia mínima entre los modelos de ambos lados de la pared. El resultado es una cuadrícula regular con un valor de espesor de pared cada 2x2 mm<sup>2</sup> o mayor, si bien los intervalos más habituales son entre 1 valor cada cm<sup>2</sup> a 5 cm<sup>2</sup>.

La documentación permite fácilmente para evaluar el espesor de pared de cada piso y apreciar si existe un proceso de pérdida de sección. Dicha documentación se utiliza en los cálculos de análisis de la estructura con el fin de obtener modelos precisos.

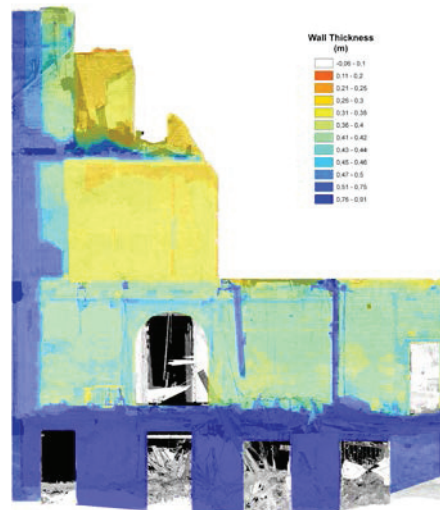


Figura 9: Grosor de muro

### 3.5 . CASO 4 : PLANEIDAD/HUNDIMIENTO DE SUELOS

De manera análoga los datos LE3D, pueden emplearse para realizar microtopografías de suelos y de este modo poder analizar su estado de conservación con información milimétrica de alta resolución. La información de detalle y continua permite conocer la cantidad y posición del máximo hundimiento y los gradientes con los que se alcanza.

## 4 . CONCLUSIONES

Es posible utilizar datos de LE3D para fines más allá de la documentación 2D y 3D tradicionales.

La información explícita de una nube de puntos son las coordenadas X, Y y Z más un nivel digital, correspondiente al nivel de gris de la respuesta del elemento a la longitud de onda del sistema LE3D (que a su vez puede variar entre 400 y 1800 nm)

Tal información explícita puede ser analizada con el fin de derivar información implícita que muestre las relaciones espaciales entre los datos tales como la distancia a un plano, desplomes, abombamientos, asentamientos, hundimientos, etc.

Se pueden emplear algoritmos de análisis sencillos con el fin de obtener información exhaustiva de las relaciones espaciales de los datos.

La información puede contener estadísticas descriptivas de una variable, la creación de una nueva variables a través del análisis de la nube de puntos y la combinación de dos o más modelos a través de estadísticas y procesos lógicos .

Todos los cálculos derivados son útiles en el proceso de restauración y deben ser tenidos en cuenta en la toma de decisiones.



## 5 . REFERENCIAS

- [1] R. Letellier . 2007 . Registro, documentación y gestión de la información para la conservación de los sitios patrimoniales : principios rectores. Biblioteca del Congreso de datos
- [2] Catalogación en Publicación . El Instituto de Conservación Getty. ISBN 978-0-89236-925-6 ( pbk. )
- [3] Blais , F., 2004 : Una revisión de 20 años de Range Sensores Desarrollo. J. of Electronic Imaging , 13 ( 1 ) : 231-240
- [4] B. Curless . 2000 . A partir de escaneos de rango a 3D Models.ACM SIGGRAPH Computer Graphics 33 ( 4 ) : 38-41 .
- [5] Dallas , DM y Mills , JP . 2006 . El escaneo láser para la conservación arquitectónica , J Architecture Conservación 12 , 35-52